

下肢加圧タイツが運動中の心臓血管系の応答と重力刺激に及ぼす効果

Effects of Lower Body Positive Pressure (LBPP) Tights on Cardiovascular Responses During Exercise and Gravitational Stimulus

永野順子* 鳥越成代** 横澤喜久子**

Junko Nagano, Shigeyo Torikoshi and Kikuko Yokozawa

要旨

長時間の立位姿勢の保持は下肢での血液貯留を促し、浮腫や疲労感の原因となる。これに対し、下肢加圧機能を有する弾性タイツの着用が有効であると考えられている。また、長時間の立位、座位の維持に際し、下肢筋群の屈曲、伸展がうつ血予防に有効だとされている。本研究は、運動中の心臓血管系の応答に着目し、20mmHg前後の弾性の下肢加圧タイツの効果を検討した。また、仰臥位で下肢陰圧を負荷し、立位姿勢時に循環系にかかる重力刺激をシミュレーションして、同タイツの着用が起立性循環失調に対して有効であるかを検証した。次の結果を得た。①下肢加圧タイツ着用によってトレッドミルランニング中の心拍数の減少（60% VO_2max で有意）と酸素脈の増加（60% VO_2max と 80% VO_2max で有意）がみられた。②60% VO_2max のペダリング運動中の心拍出量、一回拍出量の有意な増加と動静脈酸素較差の有意な減少がみられた。③下肢陰圧負荷による収縮期血圧の低下と心拍数の増加を下肢加圧タイツ着用によって抑制する傾向がみられた。これらの結果から、同タイツが運動中の静脈還流量を増加させる効果が示唆された。また、長時間の立位姿勢の維持等で起こる循環系への負担を抑制する効果が示唆された。

●キーワード：下肢加圧タイツ（LBPP Tights）／心臓血管系の応答（Cardiovascular responses）
重力刺激（Gravitational stimulus）

背景

スポーツウェアのメーカーはスポーツ用の着圧（コンプレッション）衣料の開発を試みている。中でもタイツやハイソックスなどの下肢加圧衣料は近年著しく開発が進んでいる。実際多くのスポーツ愛好家やアスリートがトレーニングやレース場面で着用している。下肢筋群を加圧することによって浮腫の改善、筋損傷の軽減、代謝産物の除去、運動効率の向上等に寄与すると考えられている。

立位姿勢を長時間続けると、重力の影響で下肢への血液貯留が起こる。これを回避するため、調節機構は心拍数を上げて心拍出量を確保し、末梢の血管抵抗を上げて一定の血圧を維持するよう調整している。一方で、下肢筋には増加した血液を心臓へと戻す静脈還流を促す作用がある。逆流防止弁を有する静脈に筋の収縮と弛緩のリズムが加わると静脈中の血液は上方へと押し上げられる（筋ポンプ作用）。

さらに静脈還流を促す方法として、下肢を物理的に加

圧する方法が考えられてきた。古くは包帯によって下腿を巻くことも行われてきた（最も典型的なのは、戦争の時代に兵士が巻いていたゲートルの例だろう）。研究手法としては、水圧による下肢加圧実験も行われてきたが^{1) 2) 3)}、最も簡便な方法は着衣によって加圧する方法であり、近年はこの方法による研究が進んでいる^{4) 5) 6) 7)}。

長時間の立位姿勢の保持が下肢の血液貯留を促すのは、重力の影響によるものであり。仰臥位で、実験的に重力負荷を再現する方法として、鳥越等は仰臥位からヘッドアップ姿勢へ転じさせる方法と下半身に陰圧負荷をかける方法（下肢陰圧法）によって循環系に対する重力刺激のシミュレーションを試みている^{8) 9)}。また、重力に抗する筋ポンプ作用としての屈伸運動と下肢陰圧中のペダリング運動が循環系へ及ぼす影響を比較検討している¹⁰⁾。

目的

本研究の目的は2点あり、第一に20mmHg前後の下

肢加圧タイツが静脈還流量の増加に有効であることを運動中の心臓血管系の応答から検証する。次に下肢陰圧法によって、仰臥位で立位時にかかる重力刺激をシミュレーションし、下肢加圧タイツが循環系の起立調節に及ぼす有効性を検証する。

対象と方法

被検者は、健康な成人女性5名であり、身体特性は表1に示した。使用した下肢加圧タイツの下腿最大周径囲における着圧は20mmHg前後であった。実験は下肢加圧タイツ（LBNPT）着用と非着用条件（control）で測定値を比較した。2条件の実験はそれぞれ異なる日に実施した。

表1：被検者（女性5名）の身体特性

	年齢 (yrs)	身長 (cm)	体重 (kg)	BMI
Mean	22.0	152.14	48.8	21.04
SD	5.16	3.68	5.36	1.57

実験1は、20分のトレッドミルランニングで、運動強度を最大酸素摂取量の60%（60% VO_2max ）と最大酸素摂取量の80%（80% VO_2max ）とし、運動前に15分の安静と運動後に10分のリカバリーをともに座位で測定した。その間、心拍数（HR）と酸素摂取量（ VO_2 ）を1分毎に連続測定した。これらの結果から安静15分、運動20分、リカバリー10分に酸素脈（ $\text{O}_2\text{Pulse} : \text{VO}_2 / \text{HR}$ ）を算出した。運動強度別に下肢加圧タイツ着用の影響を検討した。

実験2は、自転車エルゴメーターによる20分のベダリング運動で、運動強度は60% VO_2max とした。運動前に15分の安静と運動後に10分のリカバリーを座位で測定した。測定項目は心拍数（HR）と動脈血圧（AP）を1分毎に連続測定した。酸素摂取量（ VO_2 ）は運動中は4～9分、14～19分の5分間を、安静、リカバリーは後半5分間をそれぞれ5秒毎に連続測定した。心拍出量（CO）を、安静の15分時、運動中の10分時、20分時、リカバリーの10分時でそれぞれ測定した。一回拍出量（ $\text{SV} : \text{CO} / \text{HR}$ ）と動静脈酸素較差（ $\text{A-VO}_2\text{Diff} : \text{VO}_2 / \text{CO}$ ）を算出した。APから1分毎の平均血圧（ $\text{MAP} : (\text{収縮期血圧} - \text{拡張期血圧}) / 3 + \text{拡張期血圧}$ ）を算出した。

実験3は、仰臥位でウェストから下をカプセル状の下肢陰圧ボックス（内部を陰圧にできる装置）内にフィッ

トさせた状態で、5分の仰臥位安静後、重力刺激としてNASAの負荷法に準拠した15分間の下肢陰圧を負荷した。負荷陰圧は、-8mmHgと-16mmHgで各1分間、-30mmHgで3分間、-40mmHgと-50mmHgで各5分間の負荷であった。その間、心拍数（HR）、酸素摂取量（ VO_2 ）、動脈血圧（AP）を連続測定した。平均血圧（MAP）と脈圧（PP：収縮期血圧 - 拡張期血圧）を算出した。

主たるパラメーターの示す指標は、概略以下となる。
① O_2Pulse ：心拍1拍あたりの酸素輸送量でSVを示唆する。
② CO：1分間に心臓から拍出される循環血液量。
③ SV：心拍1拍あたりの拍出量で静脈還流量に依存するので重要な静脈還流量の指標となる。
④ MAP：動脈渾流圧を示し、COと総末梢血管抵抗の積となる。
⑤ $\text{A-VO}_2\text{Diff}$ ：動脈血と静脈血の酸素量の差であり、COとともに VO_2 を規定する要因となる。
⑥ PP：収縮期血圧と拡張期血圧の差であり、SVを示唆する。

以上の3実験を通して、HRは胸部誘導法、APは聴診法でそれぞれ測定し、 VO_2 は実験1は、ダグラスバッグ法、実験2、3は質量分析器による代謝測定システムで連続測定した。COはアセチレンガス再呼吸法によって測定した。データは一对の平均値の差の検定によって統計処理し、5%水準を有意差とした。

結果と考察

実験1

図1に典型例として被検者YAについて、60% VO_2max と80% VO_2max のトレッドミルランニング中のHRの安静最終時からリカバリー終了時までの経時変化を示した。HRと VO_2 について、安静（rest）15分、運動（exer.）20分、リカバリー（rec.）10分の測定値を被験者の平均値 \pm SDで示すと図2と図3であった。いずれの運動強度においても、下肢加圧タイツ着用条件では非着用に比べて安静時と運動時のHRの減少と VO_2 の増加傾向が見られたが、平均値の差の検定で有意差（ $p < 0.05$ ）が認められたのは60% VO_2max の運動中のHRのみであった。一方、 O_2Pulse を算出し、平均値 \pm SDで示すと図4の結果となった。その結果、60% VO_2max の安静時と運動中、80% VO_2max の運動中に両条件間に5%水準で有意差が見られ、下肢加圧タイツの着用による増加が示された。 O_2Pulse は簡便にSVを

推測するための指標となるため、60 % VO_2max 、80 % VO_2max とも運動中における SV の増加が示唆された。

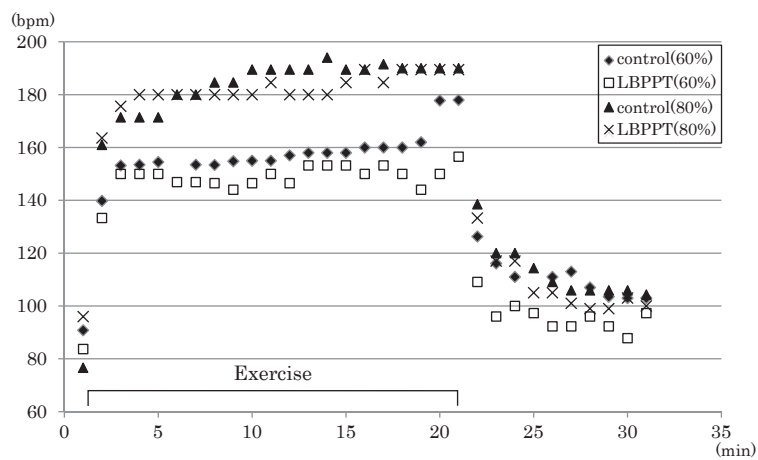


図 1 被験者 YA の心拍数の経時変化

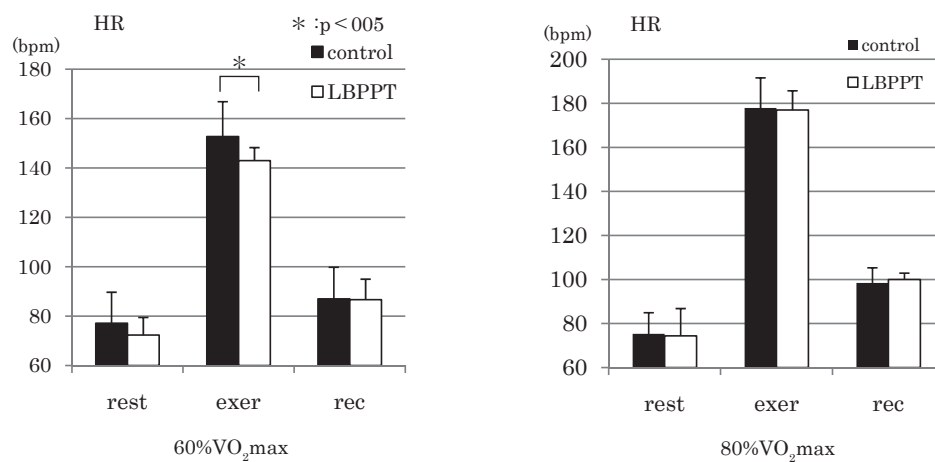


図 2 60% VO_2max と 80% VO_2max の心拍数の平均値 \pm SD

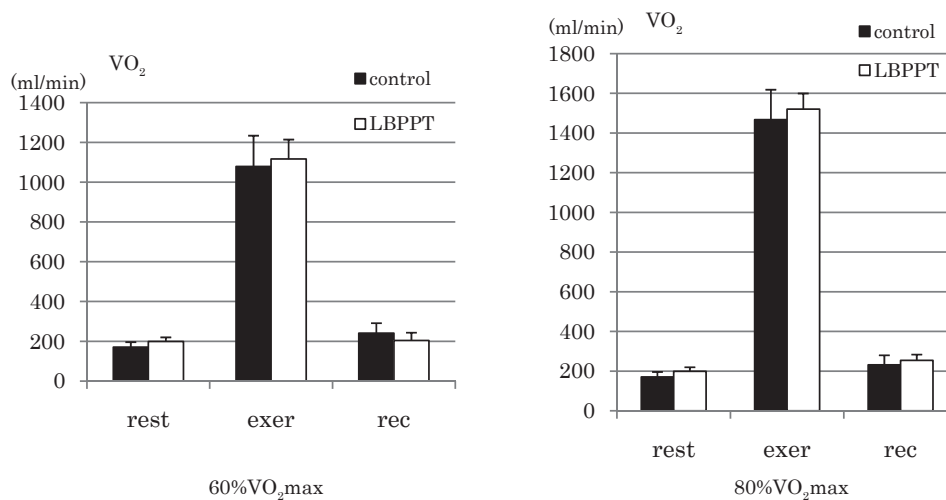


図 3 60% VO_2max と 80% VO_2max の酸素摂取量の平均値 \pm SD

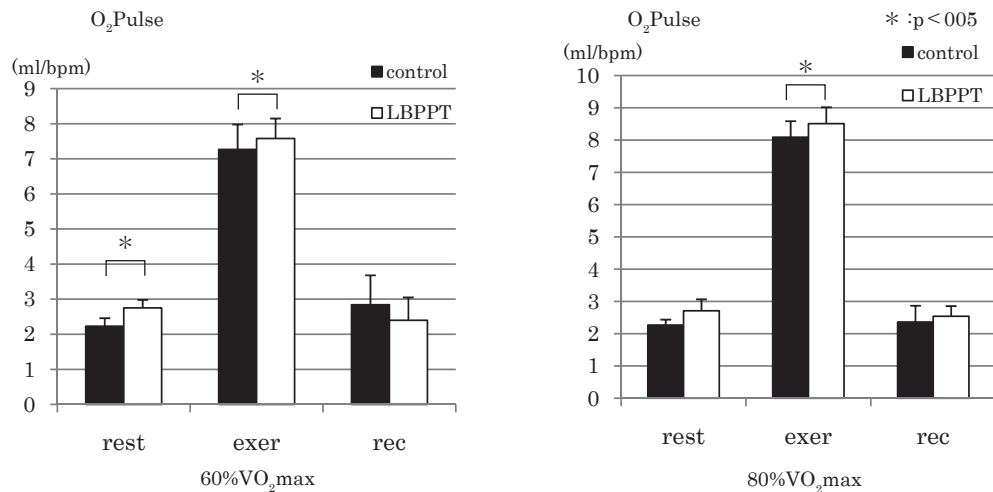


図4 60% VO₂max と 80% VO₂max の酸素脈の平均値±SD

実験2

図5に典型例として被検者NUについて60% VO₂max ペダリング運動における安静最終時からリカバリー終了時までのHRとMAPの経時変化を示した。

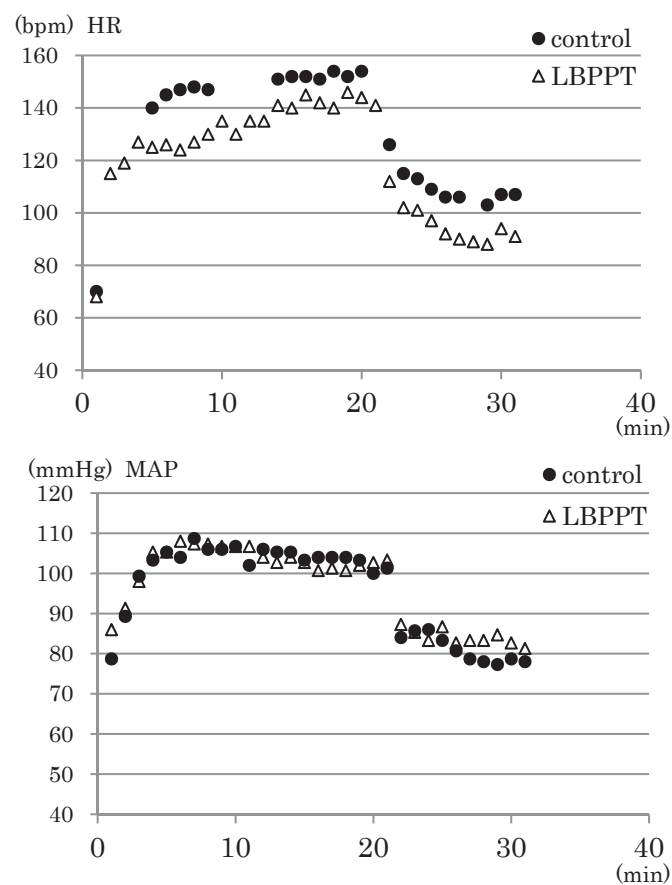


図5：60% VO₂max のペダリング運動の心拍数と平均血圧の経時変化（被検者 NU）

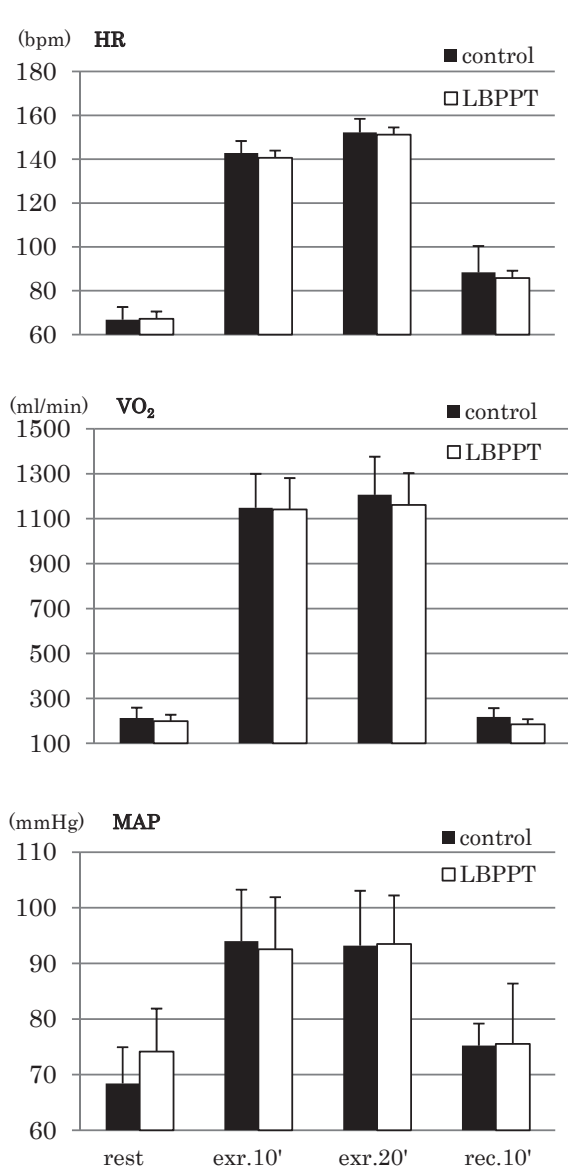


図6 心拍数, 酸素摂取量, 平均血圧の平均値 ± SD

図6に安静 (rest)、運動10分時 (ex.10')、20分時 (ex.20')、リカバリー10分時 (rec.10')におけるHR、VO₂、MAPの測定値を全被検者の平均値 ± SDで示した。下肢加圧タイツの着用と非着用の間には差は認められなかった。同様にCO、SV、A-VO₂Diff.について被検者の平均値 ± SDで示すと図7になった。運動中のCOとSVは下肢加圧タイツ着用条件で増加し、A-VO₂Diff.は減少を示した。平均値の差の検定から、運動10分時とリカバリー (SVとA-VO₂Diff.)で有意差 ($p < 0.05$)が見られた。

SVは静脈還流量に依存する (Starlingの法則) ことから、下肢加圧タイツ着用によるSVの増加は静脈還流量の増加を示唆するものである。

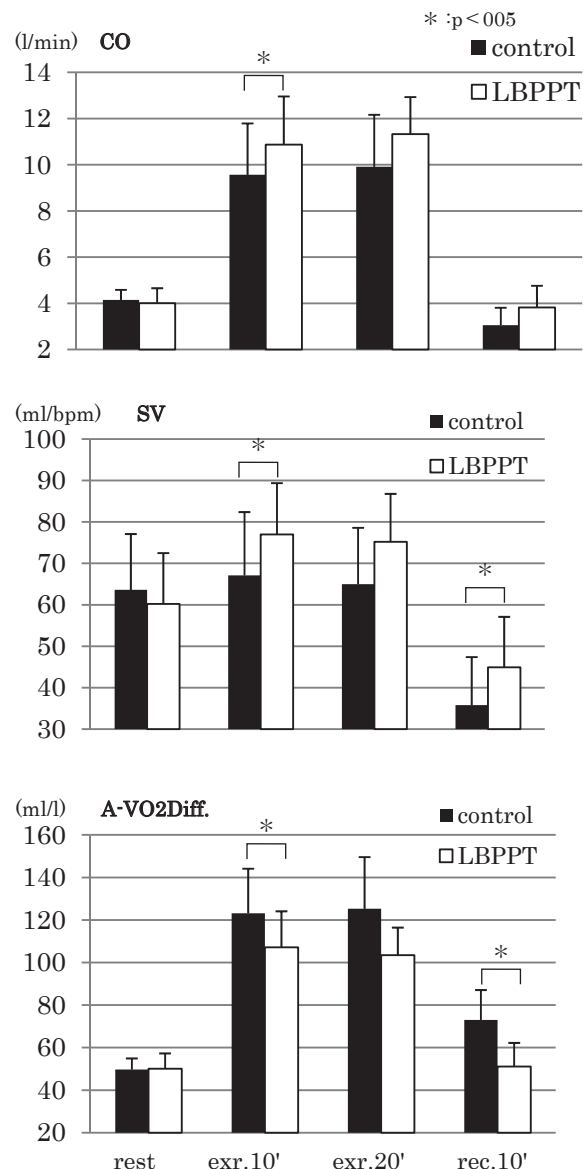


図7 心拍出量, 一回拍出量, 動静脈酸素較差の平均値 ± SD

図8は全被検者の運動中の値をプロットしたもので、静脈還流量を示唆するSVに対して、VO₂、MAP、CO、A-VO₂Diff.の関係を示したものである。VO₂は一定の関係を示さなかったが、COは有意な正の相関関係を示し、MAPとA-VO₂Diff.には負の相関関係 ($p < 0.05$)が見られた。MAPは動脈系の灌流圧とみなされ、COと末梢血管の総抵抗 (総末梢血管抵抗) との積によって求められる (Poisuilleの法則) ことから、図8においてSVに対するMAPが下肢加圧タイツの着用条件の方が上昇するのは、COで両条件間に差がみられないことから、一定のSVに対して総末梢血管抵抗が上昇した結果だと考えられる。

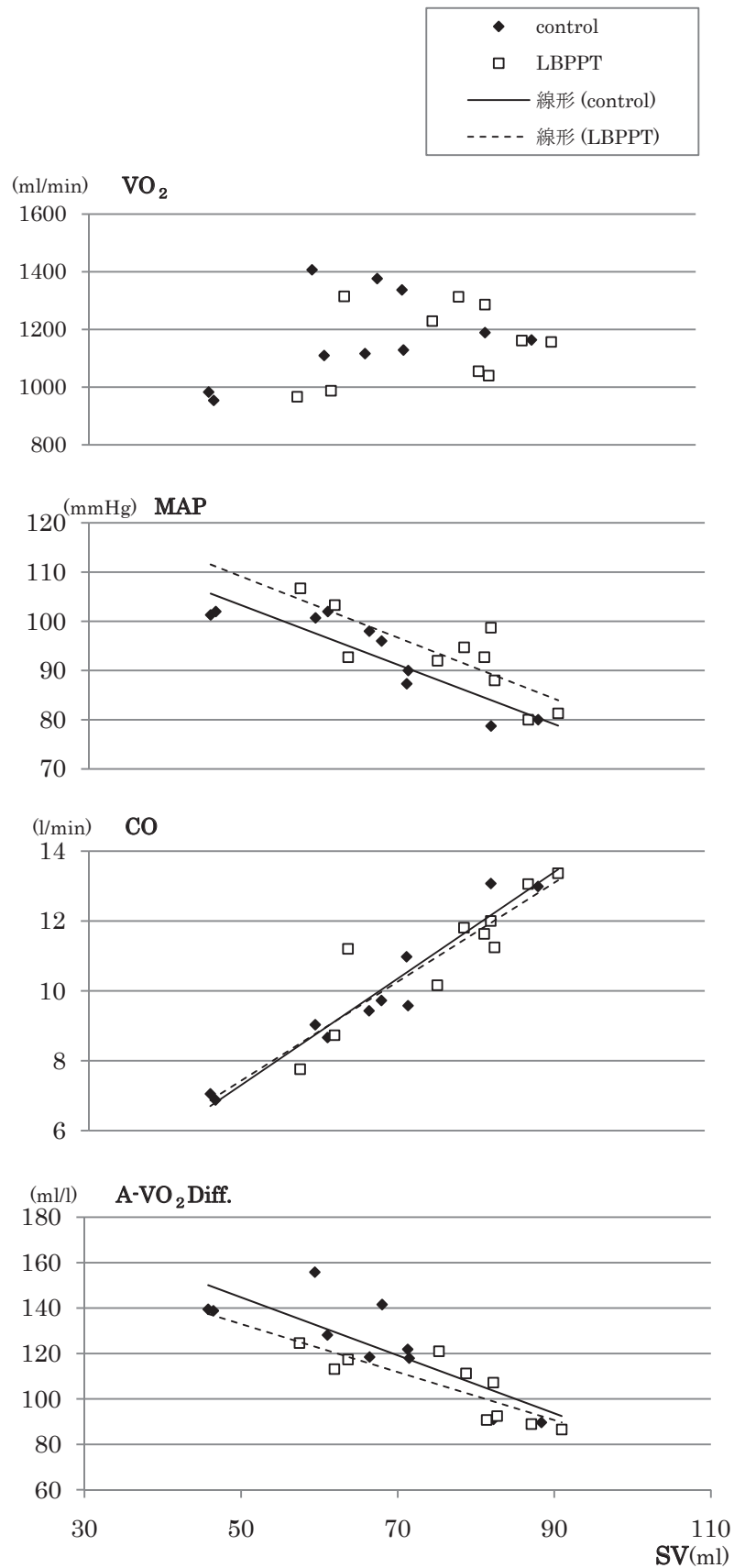


図8 一回拍出量に対する酸素摂取量、平均血圧、心拍出量、動静脈酸素較差の関係

実験3

下肢陰圧法によって漸増的に下肢に陰圧負荷をかけたが、control（タイツ非着用）の条件で5名中2名が -50mmHg （10分以降）を5分間持続できなかったため、 -50mmHg では3分間のデータ採用とした。

下肢陰圧法によって重力刺激を負荷した際のHR、 VO_2 の経時変化を被検者の平均値で示すと図9となった。HRは下肢陰圧負荷とともに上昇し、下肢加圧タイツの着用は上昇の変化量をやや抑える傾向がみられた。 VO_2 は4分以降は変化を示さなかったが、同タイツ着用ではやや多くなる傾向がみられた。APの経時変化を平均値で示すと図10になった。負荷の増大に伴って、収縮期血圧（Ps）は低下し、拡張期血圧（Pd）は

上昇する傾向を示した。下肢加圧タイツの着用によって、収縮期血圧の低下が抑制される傾向が示された。それは -50mmHg 以降（10分以降）で顕著であった。MAPとPPの経時変化を被検者の平均値で示すと図11となった。PPは陰圧負荷により低下傾向を示したが、下肢加圧タイツの着用によって低下の変化量が小さく抑えられる傾向がみられた。これは収縮期血圧の低下が抑制された結果であり、 -50mmHg の負荷（10分以降）で顕著であった。最も負荷強度が高い -50mmHg において変化傾向のみられたHRとPPについて、測定した3分間の結果を平均値 \pm SDで図12に示した。下肢加圧タイツの着用によってHRは減少傾向を示し、PPはやや増大したが有意ではなかった。

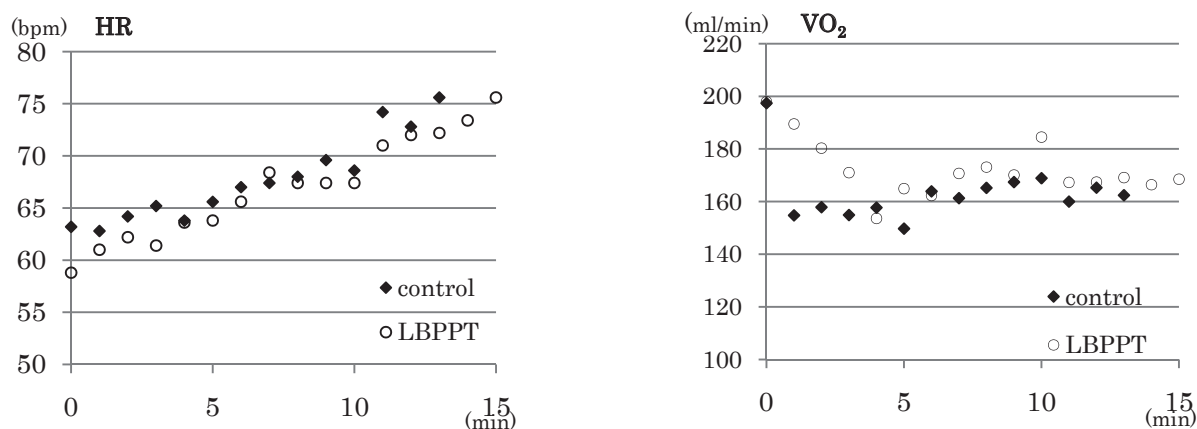


図9 下肢陰圧における心拍数と酸素摂取量の平均値

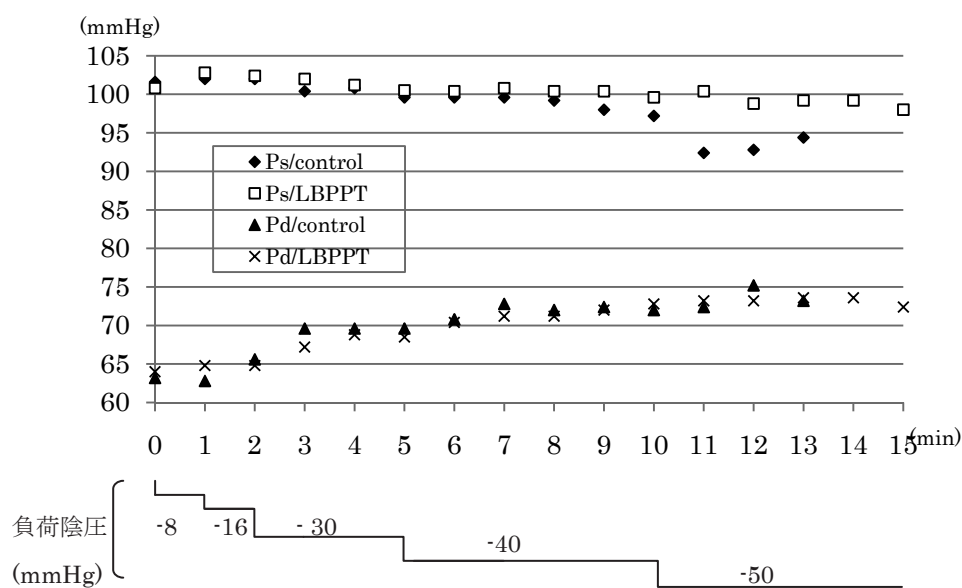


図10 下肢陰圧における収縮期血圧（Ps）と拡張期血圧（Pd）の経時変化（平均値）

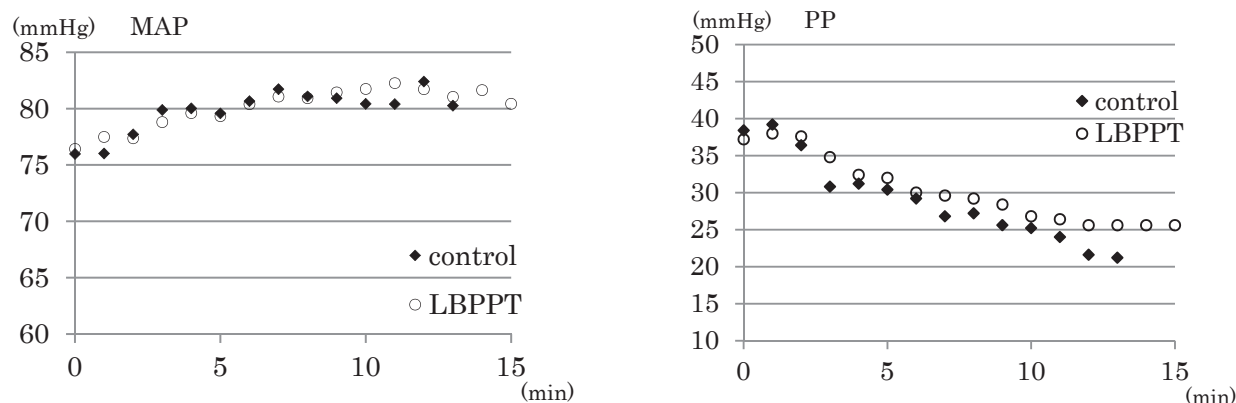


図 11 下肢陰圧における平均血圧と脈圧の経時変化（平均値）

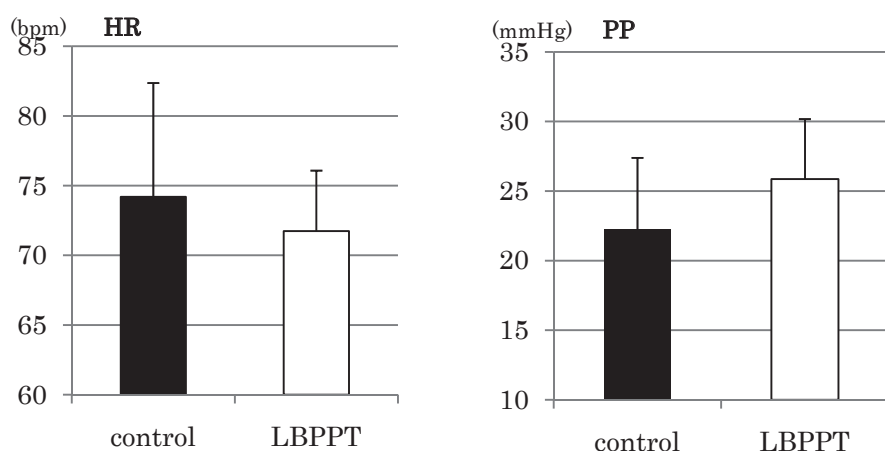


図 12 - 50mmHg 下肢陰圧負荷中の心拍数と脈圧（11 分から 13 分の平均値± SD）

PP は心臓の左心室の収縮、弛緩の圧の差であるが、収縮、弛緩の容積の差である SV と動脈伸展性等を変数としている。したがって、PP を SV の指標とみなしている。このことから、SV と同様に PP から静脈還流量の変化を推測すると、下肢加圧タイツの着用は下肢陰圧法によって負荷された重力刺激に対して、静脈還流量の減少を抑制することが示唆された。また、- 50mmHg に減圧しても HR の増加や PP の低下を抑制する傾向がみられたことから、下肢加圧タイツは起立性循環失調に対して一定程度有効であることが示唆された。

60 % VO_{2max} 強度のペダリング運動において下肢加圧タイツの着用による一回拍出量の増加がみられた（ランニング運動では一回拍出量の増加が示唆された）。この結果から、下肢加圧タイツの着用による中等度運動中の静脈還流量の増加が示唆された。また、同タイツの着用条件では重力負荷に対する心拍数の増加や収縮期血圧の低下を抑制する傾向がみられ、循環系の起立調節にお

ける下肢加圧タイツの効果が示唆された。

まとめ

1. 着圧 20mmHg 前後の下肢加圧タイツの着用で、60 % VO_{2max} のトレッドミルランニング中の心拍数の減少が見られた。酸素脈は 60 % VO_{2max} 、80 % VO_{2max} で有意に ($p < 0.05$) 増加した。一回拍出量の増加が示唆された。
2. 60 % VO_{2max} のペダリング運動中の心拍出量、一回拍出量の増加と動静脈酸素較差の減少が見られた。
3. 下肢陰圧負荷によって収縮期血圧の低下傾向が示されたが、下肢加圧タイツ着用によって抑制され、脈圧の低下が小さく抑えられた。心拍数の上昇が抑制される傾向がみられた。これらは -50mmHg で顕著であった。
4. 中等度運動中に下肢を 20mmHg 前後の着圧を有するタイツで加圧することで、一回拍出量に示唆される静脈還流量を増加させる効果が示された。重力に抗して立位姿勢を保持し続けることで起こる循環系への負荷をよ

り小さく抑える効果が示唆された。

謝辞：元聖学院大学教授の故鈴木洋児先生にご助言賜りましたことを記し、厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 永野順子他 6 名 Static Hand Grip Contraction が静水圧変化に伴う心臓血管系の応答に及ぼす影響 体力科学 Vol.36 No.6 1987: 712
- 2) Nagano J. et al : Cardiovascular responses to moderate exercise during water immersion in women The Physiologist 33 No.1 1990: 44-45
- 3) Nagano J. et al: Cardiovascular responses to oxygen uptake during exercise in axillary water immersion in women The Physiologist 34 No.1 1991: 160-161
- 4) Suzuki Y. et al : Effects of LBPP stocking on cardiovascular responses during rest and exercise LBNP and upright position in women The Physiologist .30 No.1 1987 72-73
- 5) Doan BK, et al: Evaluation of a lower-body compression garment. J Sports Sci. 21 2003 601-610
- 6) Sperlich B, et al. Cardio-respiratory and metabolic responses to different levels of compression during submaximal exercise. Phlebology 26 2011 102-106
- 7) MacRae BA, et al : Pressure and coverage effects of sporting compression garments on cardiovascular function, thermoregulatory function, and exercise performance. Eur J Appl Physiol. 112 :2012 1783-1795
- 8) Torikoshi S. et al : Difference in cardiovascular responses to blood pooling patterns between LBNP and head-up tilting stimulated after mild supine cycling in women The Physiologist 32 No.1 1989 88-89
- 9) 鳥越成代 他 5 名 仰臥位運動後の Head-up Tilting と Lower Body Negative Pressure 刺激に伴う脚容量変化と心臓血管系の応答 日本体育学会第 40 回大会号 1989 315
- 10) Torikoshi S. et al : Comparison of cardiovascular responses during post-exercise between pedaling exercise exposed to -50mmHg LBNP and knee bent exercise The Physiologist. 33 No.1 1990 162-163
- 11) 鈴木洋児 他 5 名 心臓血管系に対する重力刺激と運動刺激—循環の恒常性に関する研究— 日本体育学会第 36 回大会号 1985 243
- 12) J. Nagano et al : Effects of Lower Leg Pressure by Compression Wear on Blood Lactate Concentration and the Anaerobic Threshold during Exercise JPFSM Vol.6 No.6 2017 459
- 13) 村瀬訓生他 12 名：段階的弾性タイツによる下肢圧迫が自転車運動中の心臓機能及び筋酸素動態に及ぼす影響（その 2） 体力科学 Vol.57 No.6 2008 721
- 14) 三浦隆他 2 名：段階的圧迫機能を持つ弾性ソックスの着用が動脈ステイフネスに及ぼす影響 体力科学 Vol.59 No.6 2010 736
- 15) 山鹿由莉他 1 名：段階圧力ソックス着用が運動中の呼吸循環応答に及ぼす影響 体力科学 Vol.61 No.6 2012 691
- 16) 宮本直他 1 名：ランニング時のコンプレッションウェア着用およびその圧迫強度が筋疲労の程度に及ぼす影響 —MR-T2 強調画像による検討— 体力科学 Vol.61 No.6 2012 585
- 17) 窪田敦之他 3 名：疲労回復またはパフォーマンス低下軽減に対するコンプレッションウェアの有用性 体力科学 Vol.63 No.6 2014 667
- 18) Ali A. et al :Graduated Compression Stockings: Physiological and Perceptual Responses during and after Exercise J Sports Sci. 25 2007 413-419
- 19) Bringard A. et al :Aerobic Energy Cost and Sensation Responses during Submaximal Running Exercise —Positive Effects of Wearing Compression Tights int J. Sports Med. 27 2006 373-378
- 20) Duffield R. et al: The Effects of Compression arments on Recovery of Muscle Performance Following Height-Intensity Sprint and Plyometric Exercise J Sci. and Med in Spots 13 Vol.1 2010 36-40
- 21) 守川恵助他 1 名：弾性ストッキング歩行が換気応答に与える影響 体力科学 Vol.60 No.6 2011 866
- 22) 木戸康平他 6 名：低圧タイツの着用が膝伸展運動時の局所筋代謝に与える影響 体力科学 Vol.62 No.6 2012 621
- 23) 張碩文他 2 名：機能性スポーツウェア着用による長時間運動時の体温上昇抑制効果 体力科学 Vol.63 No.6 2013 518
- 24) S. Mizuno, et al :Wearing compression garment on the thigh during prolonged running attenuated exercise-induced increase in muscle damage maker in blood JPFSM Vol.6 No.6 2017 416
- 25) 山本一博：心臓の機能と力学 文光堂 2014